Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

Análisis del Desempeño Armónico de un Compensador Estático de Reactiva

Ing. D. Castagna Ing. M. Croce Ing. C. Nieto Ing. R. Normey

Gerencia de Sector Electrónica de Potencia
Gerencia de Area Trasmisión
UTE – Uruguay

Resumen: Dentro del marco de recuperación del compensador estático de reactiva existente en la subestación de Montevideo A - 500 kV, se encaró el análisis e interpretación del comportamiento de las corrientes armónicas, evaluando la eficacia del filtro.
Fue modelada la red eléctrica de interés validando con medidas en campo el equivalente en frecuencia utilizado para la red externa. Se analizaron en forma teórica la distribución de corrientes armónicas que son inyectadas en la red externa y por el filtro, haciendo especial hincapié en el 5to y 7mo armónico (característicos en esta instalación).
Del análisis efectuado se concluyó que el filtro existente no es el adecuado, provocando en ciertas topologías de operación un incremento de la inyección de corrientes armónicas en la red (comportamiento contrario a su objetivo inicial) realizándose medidas en campo que confirmaron los resultados teóricos obtenidos.
Como consecuencia de lo anterior se estudió la posibilidad de eliminar en forma definitiva el filtro, analizando la distribución de corrientes armónicas así como la distorsión armónica en la tensión. Se concluyó que es posible eliminar el filtro cuando los cuatro bancos de condensadores están desenergizados, beneficiando al sistema con –29 MVAR adicionales, sin implicar inversión ninguna a la empresa. Por otra parte se concluyó también que el filtro, debe ser el primer banco en ser energizado ya que de lo contrario para algunas configuraciones se puede producir resonancias peligrosas.
Desde fines de febrero de este año, se implementó esta nueva modalidad de operación, sin haberse producido inconvenientes a la fecha.

Palabras - claves: armónicos, impedancia armónica, resonancia armónica, desempeño armónico, red eléctrica de Trasmisión.

1. INTRODUCCIÓN

En la Subestación Montevideo A-500 kV se encuentra en operación desde 1983 un compensador estático de reactiva (CER) diseñado y construido por CGEE-ALSTHOM, que regula la tensión en barras de 150 kV en forma automática (ver figura 1.1).
El mismo está compuesto por :

- 4 bancos de condensadores maniobrados automáticamente, (28 MVAR cada uno),
- 1 banco de filtros (de 5ta y 7ma armónica, 29 MVAR),
- reactores controlados por tiristores (TCR).

En la actualidad 2 de los 4 bancos de condensadores deben estar en "standby" (solo dos bancos se pueden operar simultáneamente) debido a la alta consigna de tensión de operación que es necesario regular en barras de 150 kV (hasta 158 kV) y la consecuente alta tensión en barras de 31,5 kV a la cual queda sometido el equipamiento del CER.

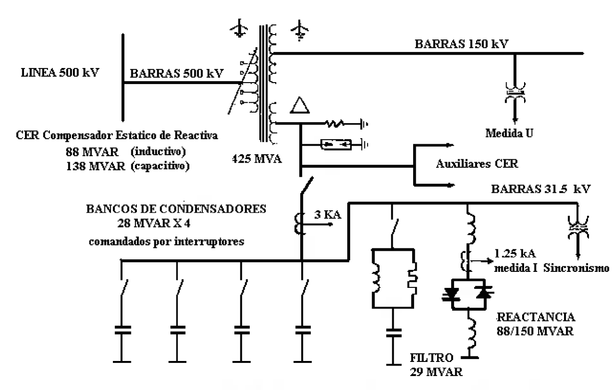


Fig 1.1 Unifilar del Compensador Estático de Reactiva.

Desde su puesta en funcionamiento, en el año 1983, hasta la fecha, se ha tomado como regla, en base a estudios realizados por el contratista de la obra previo a la puesta en servicio, que para operar el TCR es condición necesaria energizar en forma previa y permanente el banco de filtros para limitar las corrientes armónicas inyectadas a la red eléctrica de Trasmisión,

Esta condición reduce el rango de potencia reactiva inductiva que el CER es capaz de consumir, en 29 MVAR.

El objeto del análisis realizado fue interpretar el comportamiento de las corrientes armónicas en el CER en las condiciones actuales de funcionamiento evaluando la eficacia del filtro. En particular se analizó el desempeño del filtro (de 5ta y 7ma armónica) interactuando con la red, complementando los análisis teóricos realizados con medidas efectuadas en campo las que validaron los resultados obtenidos.

2. MODELO ELÉCTRICO UTILIZADO.

Para el análisis de las corrientes armónicas, se utilizó un esquema simplificado de la red, el cual se presenta en la fig. 2.1. Este está compuesto por:

- reactores controlados por tiristores (TCR); estos son modelados como una fuente de corriente de armónicos.
- banco de filtros de 5ta y 7ma armónica,
- 2 bancos de condensadores,
- equivalente en frecuencia de la red, visto en bornes del bobinado de 31.5 kV del transformador de la Subestación Montevideo A - 500 kV.

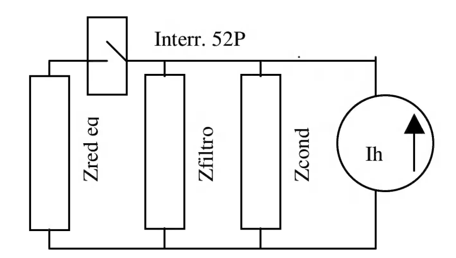


Fig. 2.1 - Esquema unifilar equivalente en estudio

2.1. Fuente de Corriente Armónica.

Esta fuente de corriente armónica fue simulada como una fuente de corriente normalizada a 1 A para todo el espectro de frecuencia (1 al 50 armónico).

2.2. Banco de Filtros.

El banco de filtros fue modelado de acuerdo al esquema de la fig 2.2.1

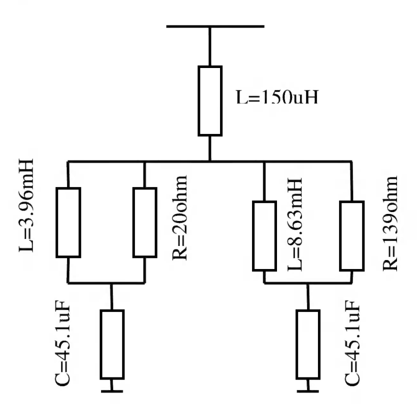


Fig. 2.2.1 - Esquema unifilar del banco de filtros

Los valores que aparecen en la fig 2.2.1, son los valores de diseño, no teniéndose a la fecha valores reales del equipamiento en las condiciones actuales de funcionamiento.

Se presenta en las figuras 2.2.2 y 2.2.3 la transferencia teórica calculada del banco de filtros en módulo y fase en el rango de frecuencias de filtrado. Si bien esta información no es representativa en cuanto a la distribución de corrientes armónicas, pues éstas dependen también de la impedancia vista hacia la red de trasmisión, da una idea conceptual de su comportamiento.

Es conveniente sintonizar los filtros a una frecuencia levemente menor a la frecuencia que se quiere filtrar ya que para obtener un comportamiento eficiente del filtro este debe tener un comportamiento inductivo a la frecuencia de filtrado, de esta manera como la red es generalmente inductiva, se obtiene un reparto eficiente de las corrientes.

La segunda razón por la que se sintoniza a una frecuencia menor es que la capacidad del banco de condensadores disminuye levemente su valor con el correr del tiempo, aumentando así el valor de la frecuencia de resonancia.

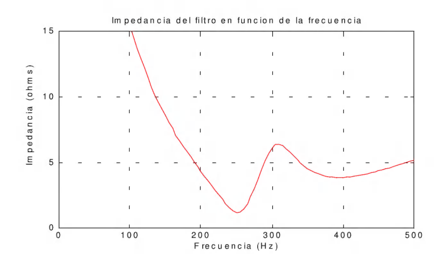


Fig. 2.2.2.- Módulo de la impedancia del filtro en función de la frecuencia

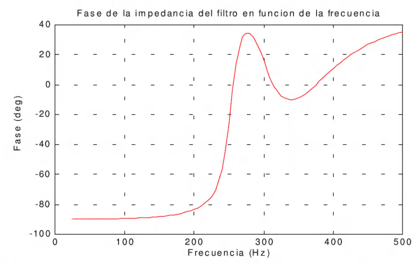


Fig. 2.2.3.- Fase de la impedancia del filtro en función de la frecuencia

En este caso en particular, los filtros están sintonizados a 251 Hz y 394 Hz (frecuencias mayores a las de filtrado), contrariamente a lo aconsejado. Además se puede observar claramente en la figura 2.2.3. que el comportamiento del filtro a las frecuencias de filtrado (250 Hz y 350 Hz) es capacitivo.

En la figura 2.2.4. se comparan los valores de impedancia en función de la frecuencia obtenidos en forma teórica contra valores medidos en campo, (en rojo valores medidos) con el registrador de armónicos cuyo detalle se indica en [1] .

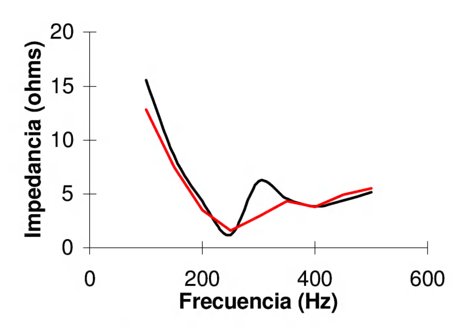


Fig. 2.2.4.- Impedancia del filtro en función de la frecuencia. Modelo teórico vs. medido

Se puede deducir que las frecuencias de resonancia del filtro, no han tenido variaciones sensibles en relación a sus valores de diseño por lo que **se entendió acertado utilizar el modelo teórico propuesto para el filtro.**

2.3. Banco de Condensadores

Cada banco de condensadores fue modelado por una inductancia de 150 uH y una capacidad de 44.8 uF.

2.4. Impedancia Equivalente de la Red.

Como impedancia equivalente de la red se utilizó únicamente la impedancia del transformador 500 kV/150 kV/31.5 kV de la estación, suponiendo potencia de cortocircuito infinita tanto en la barra de 500 kV como en la barra de 150 kV. Entonces la impedancia de la red la obtuvimos como la impedancia del bobinado de 31.5 kV del transformador sumada al paralelo de las impedancias de los otros dos bobinados:

Zred eq (p.u.) = 0.0296 (base 100 MVA)
Zred eq (ohm) = 0.294 (a 50 Hz)

En la fig 2.4.1 se comparan los valores de impedancia en función de la frecuencia obtenidos en forma teórica (Modelo A) contra los valores medidos en campo con el registrador de armónicos ya citado.

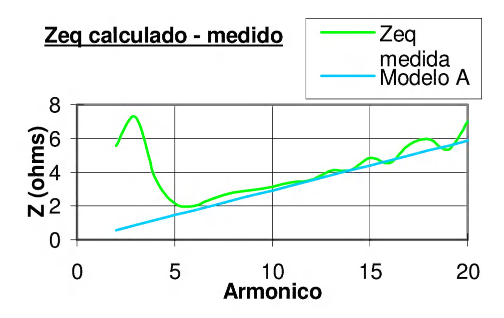


Fig. 2.4.1. Comparación entre el modelos teórico y los valores obtenidos en campo

Se puede observar que el modelo utilizado se asemeja al medido en campo para el rango de frecuencias de interés. Por lo tanto **para los análisis teóricos siguientes se utilizó este modelo (validado con medidas de campo.)**

3. DESEMPEÑO DE LOS FILTROS

Con el modelo de la red , filtros y condensadores descripto en los puntos anteriores, se analizó la distribución de las corrientes armónicas.

En el modo de operación actual, se pueden presentar las siguientes configuraciones:

- TCR / banco de filtros
- TCR / banco de filtros / 1 banco de condensadores
- TCR / banco de filtros / 2 bancos de condensadores

La correspondencia de las curvas que se presentan a continuación es la siguiente:

- Curva roja: corriente armónica generada por los reactores normalizada a 1 p.u.
- Curva azul: corriente inyectada en la red (a través del interruptor principal de la barra de 31,5 kV, 52P).
- Curva amarilla: corriente por el banco de filtros.
- Curva verde: corriente por el banco de condensadores.

3.1 TCR / Banco de Filtros.

Se puede observar claramente, en la figura 3.1.1, la poca eficacia del filtro a la hora de reducir la inyección de armónicos en el sistema. Este se diseñó para filtrar las corrientes de 5to y 7mo armónico. Por el contrario para el 5to armónico, con las hipótesis realizadas en este modelo, no estaría filtrando nada y para el séptimo armónico el porcentaje de filtrado es mínimo.

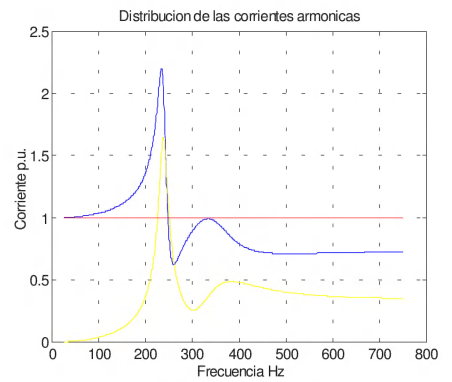


Fig. 3.1.1. Distribución de las corrientes armónicas

Otro punto que explicaría en parte este comportamiento es que la impedancia de la red (valores en ohms) es del mismo orden que la impedancia del filtro a la frecuencia de filtrado, si bien esta no es la causa principal.

3.2. TCR / Banco de Filtros / 1 Banco de Condensadores.

Se observa, en la fig. 3.2.1, poca modificación de los valores de corriente por el 52P para el 5to armónico pero sí un aumento del 20% aproximadamente para el 7mo. También se observa un aumento considerable para el 11 y el 13 produciéndose una resonancia para el armónico de orden 16.

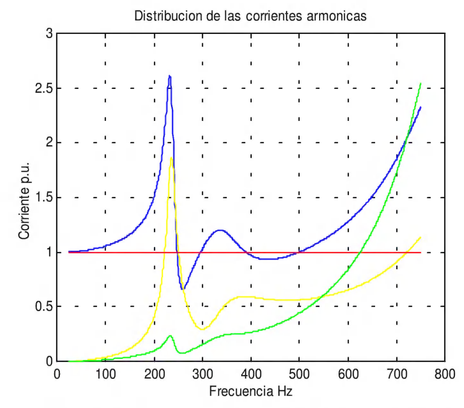


Fig 3.2.1. Distribución de las corrientes armónicas

3.3. TCR / Banco de Filtros / 2 Banco de Condensadores.

Se observa nuevamente poca modificación de los valores de corriente por el 52P para el 5to armónico y un aumento del 50% aproximadamente para el 7mo. También se observa un aumento considerable para el 11 y el 13 produciéndose una resonancia para el armónico de orden 12.

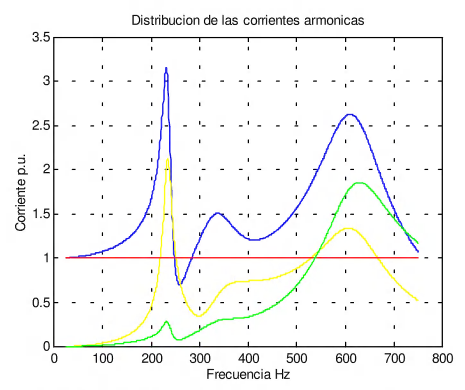


Fig 3.3.1 Distribución de las corrientes armónicas

4. MEDIDAS OBTENIDAS EN CAMPO

Teniendo en cuenta los resultados teóricos obtenidos y presentados en el punto anterior se realizaron medidas en campo a los efectos de verificar dichos resultados.

Se registraron las medidas de corriente en el 52P, rama de tiristores, banco de filtros y 1 banco de condensadores. Para los parámetros medidos se obtuvieron los valores eficaces de los armónicos individuales (valores máximo y medios).

4.1. Corrientes de 5to Armónico en TCR, Filtro y 52P.

La corriente de 5ta armónica generada por el TCR, es la de mayor importancia debido a su magnitud.
A continuación se presentan las gráficas con la 5ta armónica en un período de 7 días, (Fig. 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3). Durante el período analizado, se registraron valores medios y máximos en intervalos de 15 minutos. La curva negra corresponde al valor máximo y la curva verde corresponde al valor medio. El registro de las tres corrientes, corresponde al mismo período de tiempo.

Cabe notar que, en la Fig 4.1.1 a los efectos comparativos, se deberá multiplicar esta corriente por un factor de raíz de 3 debido a que los reactores están conectados en triángulo y la corriente medida es la de rama.
Se observa que las tres corrientes armónicas son del mismo orden, confirmando la poca eficacia del filtro para esta corriente armónica.

A los efectos de clarificar los resultados obtenidos, se graficó la corriente por el 52P en función de la corriente por el TCR . Este gráfico se presenta en la fig 4.1.4.

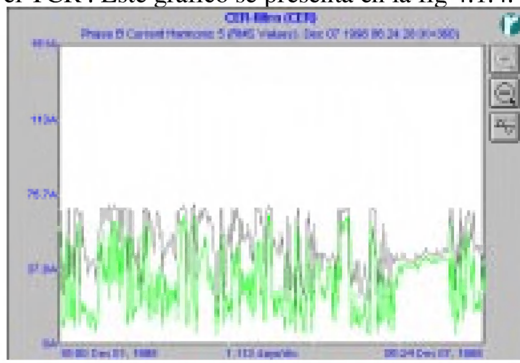


Fig. 4.1.1 - Corriente 5to armónico por una rama del TCR

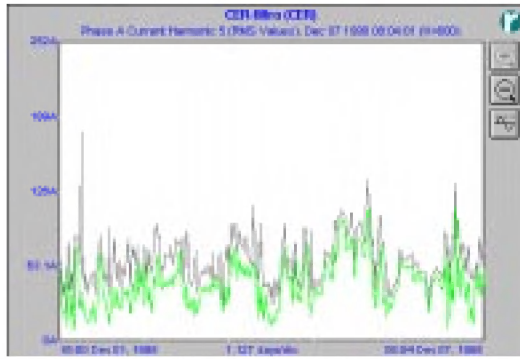


Fig. 4.1.2 - Corriente 5to armónico por el 52P

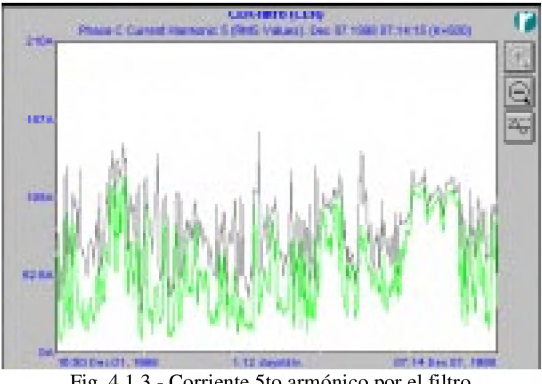


Fig. 4.1.3 - Corriente 5to armónico por el filtro

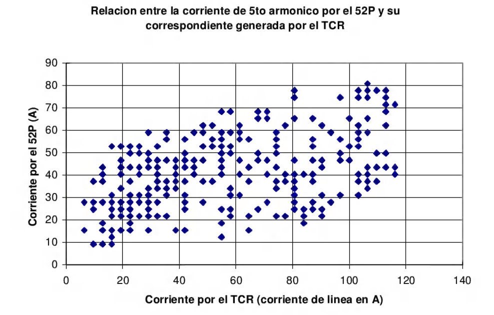


Fig. 4.1.4.- Corriente por el 52P vs. corriente por el TCR

Se puede observar, que la relación I_{52P} / I_{tcr} tiene una tendencia a tomar el valor 1. El registro del cual se obtuvieron estos datos, es de 4 semanas; en dicho periodo además de operar en la configuración descripta anteriormente en el estudio teórico, se energizaron en forma automática cuando así se requirió, los bancos de condensadores adicionales.
Esto explica la dispersión del conjunto de puntos.
Considerando un período en donde los dos bancos de condensadores habilitados se encuentran desenergizados, y graficando nuevamente la corriente por el 52P vs. la corriente de línea por el TCR se obtuvo el resultado presentado en la fig. 4.1.5

Se observa efectivamente que **la distribución de corrientes coincide con los resultados teóricos obtenidos**. Se observa además que existen periodos en que la utilización del filtro empeora aún más, el desempeño armónico del CER en su conjunto. Los valores utilizados en las figuras 4.1.4. y 4.1.5, corresponden a valores medios.

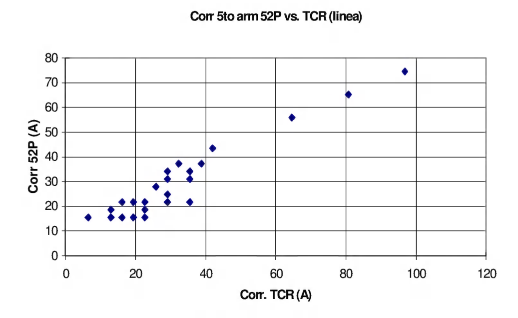


Fig. 4.1.5.- Corriente del 5to armónico vs. corriente por el TCR (bancos desenergizados)

4.2. Corrientes de 7mo Armónico en TCR, Filtro y 52P.

Realizando un procedimiento análogo, ahora para las corrientes de 7mo armónico se compararon los resultados obtenidos graficando la corriente por el 52P en función de la corriente de línea del TCR. Estos resultados se presentan en la figura 4.2.4. Cabe notar que los puntos I_{52P}/I_{tcr} de esta figura corresponden a tres modos de funcionamiento:

- sin ningún banco de condensadores energizado
- con un banco de condensadores energizado
- con dos bancos de condensadores energizado

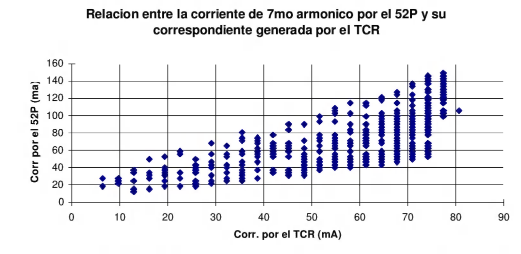


Fig. 4.2.4.- Corriente 7mo armónico por el 52P vs corr por el TCR

Considerando nuevamente un periodo en que los bancos de condensadores habilitados se encuentran desenergizados, y graficando la corriente por el 52P vs. la corriente de línea por el TCR se obtuvo el resultado que se presenta en la fig 4.2.5.
Se puede observar claramente una relación levemente inferior a 1 entre la corriente generada por el TCR y la corriente que fluye por el 52P. **Esto coincide efectivamente con la distribución de corrientes obtenidas en los análisis teóricos.**

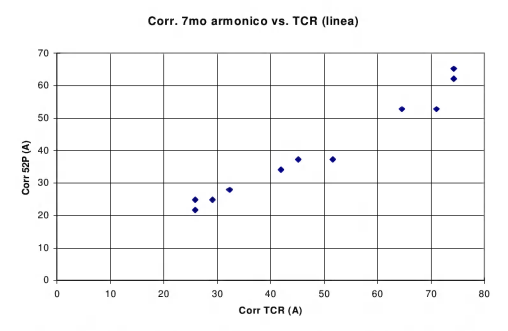


Fig. 4.2.5.- Corr 7mo armónico vs. corr TCR (linea)

Los valores utilizados en las figuras 4.2.4 y 4.2.5, corresponden a valores medios registrados.

5. NIVELES DE ARMONICOS EN TENSIÓN Y CORRIENTE.

De lo analizado hasta el momento, **se pudo deducir que la utilización del filtro no disminuía la inyección de corrientes armónicos en la red**.

El paso siguiente fue conocer cuales eran los niveles de distorsión armónica en tensión en la barra de 31.5 kV para determinar si era necesario re-sintonizar el filtro para no superar los niveles máximos admitidos, o si era posible trabajar sin el filtro de armónicos.
Utilizamos como punto de referencia, los límites de emisión de armónicos establecidos por el Marco Regulatorio Argentino [2]

La distorsión total en tensión admitida en este Marco es del 3 % y la individual para el 5to y 7mo armónicos, 2 %.

En este caso, de los registros obtenidos se observó que la distorsión total no supera el 2% y que para el 5to y el 7mo armónicos se tiene aproximadamente 1 % y 1.5 % de distorsión individual.

Por lo tanto la distorsión generada por el CER no supera los valores armónicos máximos admitidos.

6. FILTRO FUERA DE SERVICIO.

Teniendo en cuenta que el filtro disipa una potencia en el orden de 150 kW, surgió la inquietud de estudiar la posibilidad de eliminar el banco definitivamente. Esto implicaría trabajar con tres bancos de condensadores dejando el filtro fuera de servicio.
Previo a tomar una decisión sobre este aspecto entre otras cosas, era necesario analizar cual sería la distribución de armónicos en este caso en las diferentes configuraciones posibles de funcionamiento.

En el modo de operación propuesto, se pueden presentar las siguientes configuraciones:

- TCR / 1 banco de condensadores
- TCR / 2 banco de condensadores
- TCR / 3 bancos de condensadores

6.1. TCR / 1 Banco de Condensadores.

Se puede observar en la fig.6.1.1, que aparece resonancia paralelo en las cercanías del armónico de orden 13 (armónico característico). Por lo tanto no es aconsejable operar en esta configuración.

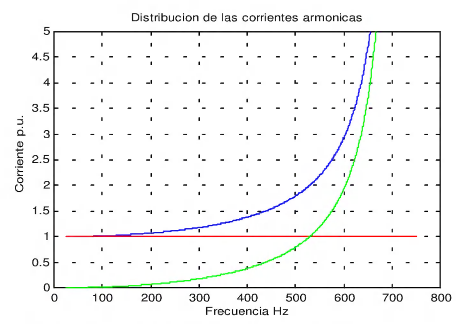


Fig 6.1.1. Distribución de las corrientes armónicas

6.2. TCR / 2 Banco de Condensadores.

Se puede observar en la fig 6.2.1, que aparece una resonancia paralelo en las proximidades del armónico 11. Dado que este armónico es característico, podría producirse un incremento de la corriente amónica de orden 11, importante.

Tomando la corriente máxima de orden armónico 11 generada por los reactores tiristorizados (16 A), el factor de amplificación máximo calculado podría llegar a un valor de 15 veces, por lo tanto la corriente amplificada llegaría a 240 A (solamente de 11 armónico por el 52 P).

Por lo tanto no es aconsejable operar en esta configuración.

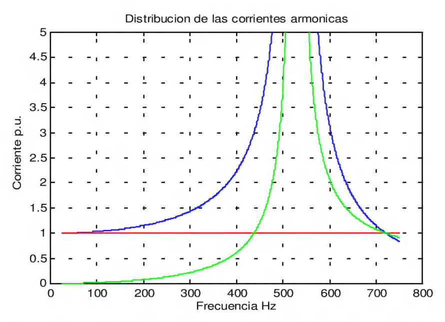


Fig 6.2.1 Distribución de las corrientes armónicas

6.3. TCR / 3 Banco de Condensadores.

Se observa en la fig 6.3.1 que la resonancia se presenta en las cercanías del armónico 9 (armónico no característico).

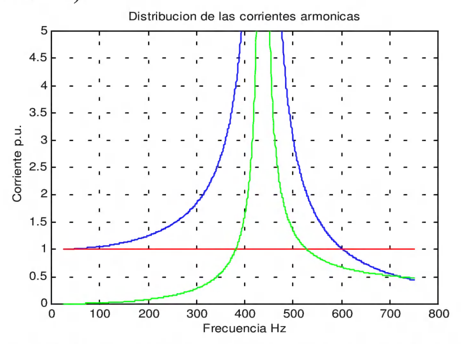


Fig 6.3.1 Distribución de las corrientes armónicas

7. CONCLUSIONES

1. Mediante medidas de campo se validaron, el modelo teórico utilizado y los resultados obtenidos en el punto 3 para el 5to y 7mo armónico.
2. Se observó que la utilización del filtro de armónicos no disminuye la inyección de corrientes armónicas en la red.
3. Se pudo constatar que tanto los inductores como los capacitores no han tenido variaciones sensibles en sus valores nominales con el correr del tiempo, por lo que este mal funcionamiento se viene suscitando desde su puesta en servicio.
4. La distorsión armónica total e individual en tensión generada por el CER no supera los valores máximos establecidos por el Marco Regulatorio Argentino [2].
5. Se observó que la energización del filtro de armónicos conjuntamente con los bancos de condensadores amortigua la resonancia para los armónicos de orden 9, 11 y 13, disminuyendo también la amplitud para el 7mo armónico.

Sobre la base de lo antes mencionado se dedujo que el banco de filtros no era necesario para limitar las corrientes inyectadas a la red y puede maniobrarse al igual que los bancos de condensadores con la única condición de que sea el primero en ser energizado y el último en desenergizarse .

A partir de febrero de 1999 el CER se encuentra funcionando en este nuevo modo de operación sin inconveniente y con un rango de reactiva inductiva ampliado en 29 MVAR adicionales, lo cual se obtuvo sin inversiones adicionales para la empresa.

Igualmente se entiende necesario profundizar los estudios, analizando los posibles efectos que las corrientes armónicas podrían provocar en el transformador reduciendo su vida útil, a los efectos de definir si es necesario rediseñar el filtro.

REFERENCIAS

[1] - RPM – Reliable Power Meter. - Equipo de medida y registro de tensiones y corrientes armónicas utilizado.

[2] – Ente Nacional Regulador de la Electricidad – Base metodológica para la Calidad del Producto Técnico – Anexo a la resolución ENRE Nº 465/96